

Forschungsprogramm "Elektrizität"

DIS-Proj.Nr. 18707



Verminderung der Verluste von Netztransformatoren

ausgearbeitet durch:

ARENA Arbeitsgemeinschaft Energie-Alternativen

Jürg Nipkow, dipl. El. Ing. ETH
Schaffhauserstrasse 34, 8006 Zürich

unter Mitarbeit von:

Dr. Gilbert Schnyder, Schnyder & Brüniger AG, Ottenbach

im Auftrag des

Bundesamtes für Energiewirtschaft

September 1997

Schlussbericht

Zusammenfassung

Netztransformatoren sind auf verschiedenen Ebenen der Elektrizitätsnutzung unerlässlich, um die Spannung dem jeweiligen Zweck anzupassen: Energietransport, Anwendungen mit unterschiedlichen Spannungsanforderungen, Elektronik. Jeder Trafo ist mit Verlusten behaftet, welche sich für die Netztrafos (ohne Hochspannungs-Energieübertragung) insgesamt zu einigen Prozenten des Landes-Stromverbrauchs summieren. Besondere Aufmerksamkeit kommt den Leerlaufverlusten der Trafos zu, weil diese meist dauernd anfallen und insbesondere bei kleinen übertragenen Leistungen einen grossen Energieanteil ausmachen können und damit einen schlechten Wirkungsgrad verursachen. In der Arbeit wurde eine "Bottom-up" Hochrechnung versucht, welche eine Summe der Trafo-Leerlaufverluste von gut 1% des Landesverbrauches ergab.

Die wichtigsten Anwendungen von Trafos werden bezüglich Verluste charakterisiert. Massenprodukte mit hohen Einschalt- bzw. Standbyzeiten, insbesondere "Konsumelektronik" wie Fernseher, Video- und Audiogeräte, verursachen die höchsten Verlustanteile. Verschiedene, traditionelle und neueste Technologien der Verlustminderung werden beschrieben und ihr Anwendungspotential sowie dessen mögliche Entwicklung abgeschätzt.

Namhafte Verlusteinsparungen sind im industriellen und gewerblichen Sektor sowie in der Energieverteilung möglich und werden dort nach Massgabe der Wirtschaftlichkeit auch realisiert. In einem Folgeprojekt soll die Situation bei den Verteiltrafos der Elektrizitätswerke genauer untersucht werden. Vergleichsweise sehr grosse Verlustreduktionen wären im Konsumelektronik-Bereich mit verfügbaren Technologien möglich, werden aber mangels Anreiz für die Hersteller (Stromkosten zahlen die Käufer) nur recht zögernd eingesetzt. Immerhin zeigt das Beispiel "Energie 2000 Label für Bürogeräte", dass mit marktkonformen Methoden ein beschleunigter Einsatz von Spartechnologien zu erreichen ist.

Abstract

Transformers adapt line voltages to different purposes of electricity use: energy transportation, applications with distinct voltage levels, electronics. Energy losses of line transformers totalize several percent of total Swiss electricity consumption. No-load losses call for special interest, as they occur continuously and – at small transformed power – cause poor efficiency. A bottom-up estimation of transformer no-load losses results in somewhat above 1% of total electricity consumption.

In the study, energy losses of significant transformer applications are analyzed. Mass products with long working or stand-by periods cause the largest amount of transformer losses. A number of traditional and recent technologies to reduce these losses are described; their actual and future application ranges and energy saving potentials are estimated.

In industry and trade, as well as in energy distribution, transformer losses can be substantially reduced; economically reasonable measures to that aim are executed. The situation of distribution transformers is to be studied thoroughly in a following project. Transformer losses of "consumer electronics" might be largely reduced by available technologies. Manufacturers hesitate to apply these, as market appreciation is doubted. The example of the Swiss "Energy 2000 Label" for energy-saving office equipment proves the efficacy of marketing methods to disseminate saving technologies.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	1
Vorwort.....	3
1. Anwendungsbereiche und Leistungskategorien von Netztrafos	4
1.1 Erzeugung und Uebertragung.....	4
1.2 Verteilung.....	4
1.3 Hochspannungsbezüger	5
1.4 Bahnstrom: Lok- und Wagentrafos	5
1.5 Trenntrafos.....	6
1.6 Netzteile für grössere Elektronikanwendungen, inkl. USV.....	6
1.7 Netzteile in Apparaten und Steuerungen, inkl. Konsumgüter-Elektronik	6
1.8 Steckernetzteile	7
2. Verlustquellen und Einflussfaktoren	8
2.1 Eisenverluste	8
2.2 Kupferverluste.....	9
2.3 Einfluss der Auslastung bzw. des Lastganges.....	9
3. Transport- und Umwandlungsverluste vom Generator bis zur Nutzenanwendung	11
3.1 Ueberblick.....	11
3.2 Verluste der Transformatoren bei den Anwendern	11
4. Technologien der Verlustminderung	14
4.1 Ansatz: Kerne aus endlosem Blechband	14
Ringkerntrafo.....	14
Schnittbandkern-Trafo	14
EMBREC-Trafo (Bandkern in Spulen hineinwickeln)	14
4.2 Ansatz: Bleche aus amorphem Metall.....	16
4.3 Ansatz: Hochfrequenz (z.B. Schaltnetzteil).....	16
4.4 Ansatz: Bedarfsgesteuert Ein- und Ausschalten (Kleintrafos)	17
5. Sparpotentiale und Realisierungsperspektiven	18
5.1 Verteiltrafos	18
"Natürlicher Ersatz" durch konventionelle gute Trafos	18
Trafos mit amorphen Blechen.....	18
Supraleitende Trafos.....	19
5.2 Trafos mit einigen kVA.....	19
EDV-, USV-, Potentialtrenn-Trafos	19
Trafos von Reisezugwagen, Speisewagen.....	19
5.3 Kleintrafos	20
5.4 Gesamtschau Trafoverluste (ab Unterwerk)	21
6. Hinweise zur Umsetzung der Sparpotentiale	22
6.1 Beschleunigung des natürlichen Ersatzes durch Kostenrechnung.....	22
6.2 Labelling, Vorschriften	22
6.3 Folgeprojekt betreffend Verteiltrafos	23
7. Literatur	24

Vorwort

Das Projekt mit dem ursprünglichen Titel "Stromspar- und Anwendungspotential von neuartigen Bandkern-Transformatoren in der Schweiz" wurde ausgelöst durch eine Entwicklung der EMBREC Corporation (Massachusetts, USA) des ausgewanderten Schweizer Emil B. Rechsteiner:

EMBREC entwickelt Maschinen zur Herstellung besonders verlustarmer und kostengünstiger Transformatoren im Leistungsbereich bis 1 MVA. Erste gefertigte Muster zeigen vielversprechende Daten. Das patentrechtlich geschützte Prinzip dieser neuen Trafos betrifft den aus einem Blechstreifen bestehenden Kern, welcher in die fertigen Spulen hineingewickelt wird. Weil diese vorgefertigten Spulen mit stärkeren Leitern als bei den bekannten Ringkerntrafos hergestellt werden können, sollen sich damit Trafos bis gegen 1000 kVA fertigen lassen. Aus der Sicht der rationellen Elektrizitätsnutzung interessierte vorerst das Anwendungs- und Stromsarpotential solcher Trafos in der Schweiz und seine mögliche zeitliche Realisierung.

Im Verlauf der Arbeit zeigte sich, dass die EMBREC-Trafowickelmaschine noch nicht marktreif ist, vor allem weil sie zu langsam ist und weil Probleme mit der Blechband-Handhabung (verschlechtert magnetische Eigenschaften) und mit der Fertigung von 3-Phasentrafos nicht auf einfache Weise gelöst werden konnten. EMBREC hält eine tiefgreifende Umentwicklung für nötig, für welche vorerst Finanzmittel gesucht werden.

Das BEW-Projekt wurde daher auf eine etwas breitere Basis gestellt und soll in erster Linie einen Ueberblick über Thematik "Verminderung der Verluste von Netztransformatoren" (dies der neue Titel) mit Bezug auf verschiedene neue Technologien geben. Im Rahmen eines Folgeprojekts soll die Thematik der Verlustminderung bei Verteiltransformatoren mit Bezug neue Technologien, auf konkrete Lastverläufe sowie auf elektrizitätswirtschaftliche Aspekte vertieft untersucht werden.

Danksagung

Für aktive Mitarbeit und Unterstützung des Projekts durch Informationen danken wir:

Herrn Emil B. Rechsteiner, EMBREC, Groton, MA, USA

Herrn Dr. Rudolf Rechsteiner, Basel

Herrn Prof. Dr. Hans Glavitsch, ETH Zürich

Herrn Dr. Thomas Aschwanden, Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH, Zürich

Herren Adolf Fankhauser und Markus Frei, EKZ, Zürich

Herrn Dr. Alexander Stoev, IDS AG, Zürich

Herrn Roland Brüniger, BEW-Projektbetreuer, R. Brüniger AG, Ottenbach ZH

Jürg Nipkow, Dr. Gilbert Schnyder

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

1. Anwendungsbereiche und Leistungskategorien von Netztrafos

1.1 Erzeugung und Uebertragung

Um die Verluste bei der elektrischen Energieübertragung (d.h. Distanzen über ca. 50 km) gering zu halten, wird eine möglichst hohe Spannung von heute 380 oder 220 kV gewählt. Durch die resultierenden relativ kleinen Ströme entstehen entsprechend geringe ohmsche Verluste in den Leitungen. Da weder Generatoren noch die feinere Verteilung mit diesen Spannungen sinnvoll ist, sind dazwischen jeweils Transformatoren erforderlich. Diese sind für Leistungen von 10 bis über 1000 MVA ausgelegt und weisen Wirkungsgrade über 99.7% auf. Sie werden hier nicht weiter betrachtet.

1.2 Verteilung

Die Energieverteilung erfolgt in zwei Stufen (vgl. Bild 1): Das Mittelspannungsnetz mit heute meist 16 kV führt die Energie den Verteiltrafos zu (in der Schweiz gegen 50'000) und verursacht rund 1.1% Verluste, wovon die Trafos mit rund 0.4% den kleineren Anteil ausmachen. Die letzte Stufe schliesslich, die Detailversorgung mit dem feinverzweigten Niederspannungsnetz, ist für rund 4.8% Verluste – ausschliesslich Leitungsverluste – verantwortlich. Alle Verlustzahlen beziehen sich auf die Netto-Stromerzeugung der Schweiz [1].

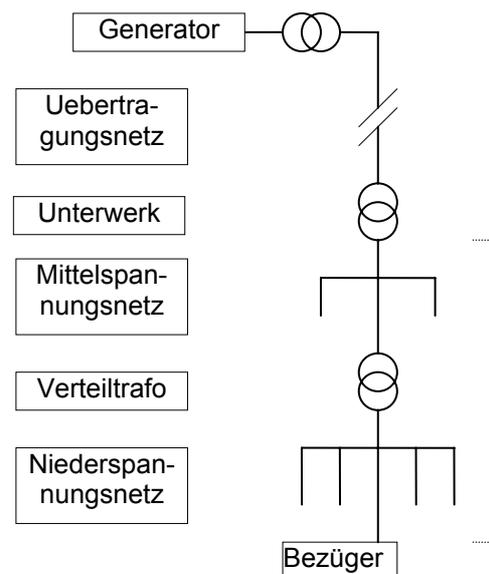


Bild 1 Elektrische Energieübertragung und -verteilung (···)

Bei den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich (EKZ) werden rund 90% der Energie über Verteiltrafos der Gössen 400, 630 und 1000 MVA abgegeben, während kleinere Trafos vor allem für die grossflächige Versorgung mit kleiner Energiedichte, meist "auf dem Land", eingesetzt werden. Der für Passanten sichtbare Extremfall kleiner Leistung ist der Mast-Transformator (Bild 2), welcher mit Leistungen bis unter 100 kVA oft Weiler oder gar einzelne Landwirtschaftsbetriebe versorgt .

1.3 Hochspannungsbezüger

Nicht alle Verteiltrafos werden von Elektrizitätswerken betrieben. Vor allem grössere Industriebetriebe, aber z.T. auch Dienstleistungsbetriebe mit grossem Stromverbrauch sind Hochspannungsbezüger mit eigenen "Verteiltrafos". Ihr Anteil am Gesamt-Stromumsatz der EW liegt meist unter 10%. Diese Trafos erfüllen genau die gleiche Funktion wie EW-Verteiltrafos, werden aber vom Bezüger selbst evaluiert, geplant und angeschafft. Vor allem in Industriebetrieben mit guter Auslastung der bezogenen Leistung dürfte sich eine höhere Trafo-Auslastung als im Mittel bei EW-Trafos ergeben. Für die Betreiber dieser Trafos gelten grundsätzlich die gleichen Wirtschaftlichkeits-Randbedingungen wie für das liefernde EW; die Verlustreduktion hat aber evtl. als "Nebenerscheinung" weniger Priorität im Management.

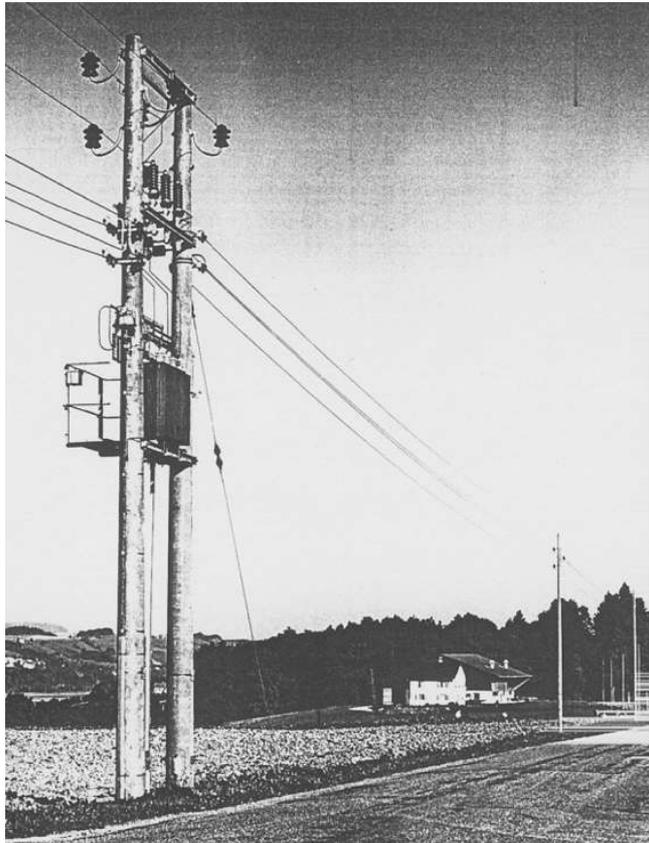


Bild 2

Mast-Transformator

1.4 Bahnstrom: Lok- und Wagentrafos

Die schweizerischen Vollbahnen benutzen Einphasenwechselstrom $16\frac{2}{3}$ Hz bei 15'000 Volt Nennspannung für die Fahrdrabtverteilung. Diese Spannung wird in einem ersten Schritt in der Lokomotive auf Spannungen heruntersgesetzt, welche für die Traktionsmotoren direkt oder via Frequenzumformer (Re 460) einsetzbar sind. Daneben wird die Energie für Komfortanwendungen (Heizung, Lüftung, Klima, Beleuchtung, Steuerungen etc.) in den Reisezugwagen und Speisewagen mit einer Nennspannung von 1000 V über die sog. Zugsammelschiene verteilt. Nur die grössten Leistungen in Wagen (Heizwiderstände der Abteilheizung, z.T. Kälteumrichter) liegen direkt an 1000 V, die anderen Verbraucher werden mit unterschiedlichen Spannungssystemen über einen Trafo von einigen kVa Leistung versorgt. Sowohl Lok- wie Wagentrafos sind aus Gewichtsgründen nicht auf besonders kleine Verluste ausgelegt.

1.5 Trenntrafos

Für einige Elektrizitätsanwendungen ist aus Sicherheitsgründen eine Potentialtrennung erforderlich, welche mit einem besonderen Trafo erreicht werden kann. Beispiele: Medizin (Operationssaal etc.), EDV-Anlagen (wobei die Potentialtrennung i.d.R. mit der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) kombiniert wird, s. dort).

Diese Trafos werden nicht in allen Fällen rund um die Uhr betrieben; so werden nach Auskunft eines Planers Operationssaal-Versorgungen nur für bei Benutzung eingeschaltet.

1.6 Netzteile für grössere Elektronikanwendungen, inkl. USV

Beispiele sind EDV-Zentralrechner, Telecom Zentralen, grosse Gebäudeleitsysteme, Flug- und Bahn-Leitsysteme. Diese Einrichtungen sind in der Regel kombiniert mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV). USV finden sich aber auch in anderen Anwendungen, deren Unterbrechung nicht akzeptiert wird (Medizin, Sicherheitseinrichtungen,...). Je nach USV-Technik befindet sich ein mehr oder weniger grosser Teil der Nennleistung dauernd in Bereitschaft, mit entsprechenden Verlusten. Dabei entfällt ein nicht unwesentlicher Teil – in der Grössenordnung von 1 bis 2% der Nennleistung – auf die Trafos.

Viele dieser Systeme werden 8760 h/a betrieben, so dass die Reduktion der Bereitschaftsverluste relativ hohe Investitionen rechtfertigt. Die Umsetzung dürfte allerdings ein Informationsproblem sein, da die Systemlieferanten an der Verlustreduktion wenig interessiert sind und die Besteller zu wenig technische Kenntnisse zur Beurteilung haben. Ein erster Schritt zur Optimierung wäre wohl, die gleiche Sprache zu sprechen bzw. eine Fachperson mit Ueberblick über die gesamte Gebäudetechnik inkl. EDV für diese Aufgabe einzusetzen.

1.7 Netzteile in Apparaten und Steuerungen, inkl. Konsumgüter-Elektronik

In dieser Kategorie des Trafoeinsatzes bis etwa 100 VA finden sich sehr viele Anwendungen mit stark unterschiedlichen Benutzungsdauern. Wir unterscheiden als Hauptgruppen "professionelle" und "Haushalt" Anwendungen, welche vor allem bezüglich Seriengrösse sowie Anzahl der betriebenen Geräte verschieden sind. Bild 3 (Tabelle) gibt einen detaillierten Ueberblick, welcher sich auf [2] stützt. Bemerkenswert ist gemäss Bild 4, dass hier im Bereich Haushalt die insgesamt grössten Leerlaufverluste zu finden sind, und zwar wegen der grossen Stückzahlen. Dies gilt allerdings nur mit der zur Zeit eingesetzten Technik.

Die in Bild 3 aufgeführten Werte (Leerlaufverlust: nur der Trafo) basieren auf "normalen" Netzgeräten mit Trafo, passivem Gleichrichter etc.. Zunehmend werden jedoch seit einiger Zeit Schaltnetzteile gebaut, welche u.a. aus Kostengründen keinen 50 Hz Trafo für die Auslegungsleistung aufweisen, sondern den für die Potentialtrennung unerlässlichen Trafo erst nach einer Frequenzumrichterstufe bei einigen kHz betreiben. Damit werden diese Trafos um Faktoren kleiner und leichter und weisen auch kleinere Leerlaufverluste auf. Allerdings ist bei billigen Schaltnetzteilen für Konsumgüter ein kleinerer Gesamt-Leerlaufverlust keineswegs sicher.

Zur Zeit sind Entwicklungen im Gange, die Schaltnetzteil-Technik auch für grössere Leistungen, bis hin zu EW-Verteiltrafos, einzusetzen, vgl. Abschnitt 4.3.

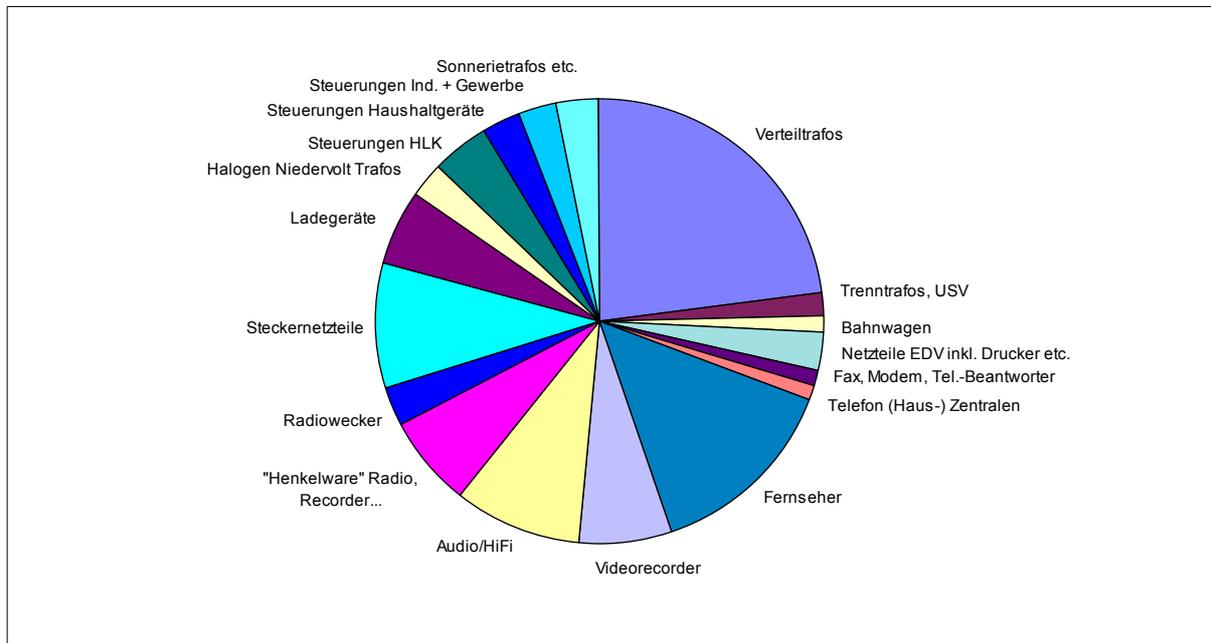


Bild 3 Leerlaufverluste von Netztrafos, Uebersicht

1.8 Steckernetzteile

Steckernetzteile sind für verschiedene Anwendungen in sehr grosser Zahl im Gebrauch und enthalten in der üblichen Ausführung einen billigen Trafo mit 2 bis 20 VA Nennleistung und 1 bis 3 W Leerlaufverlust. Nebst Gleichrichter und Glättungskondensator ist in Ausführungen höherer Qualität eine Spannungsstabilisierung mit fester oder einstellbarer Ausgangsgleichspannung vorhanden, welche jedoch den Leerlaufverlust kaum erhöht.

Die Trafos für Halogen-Kleinspannungslampen werden zunehmend ebenfalls als Steckernetzteil gebaut, um den Trafo nicht in der Leuchte unterbringen zu müssen. Bei dieser Bauart ist der Leuchtschalter zwangsläufig kleinspannungsseitig, d.h. der Trafo ist immer in Bereitschaft (wenn eingesteckt). Da es um 20...50 W Leistungen geht, liegen die Leerlaufverluste z.T. über 3 W.

2. Verlustquellen und Einflussfaktoren

Bei der Beurteilung von Trafoverlusten wird meist von Leerlauf- und Lastverlusten gesprochen, für welche aus physikalischer Sicht die nachstehend erläuterten Eisen- und Kupferverluste massgebend sind. Die Leerlaufverluste werden hochspannungsseitig bei Nennspannung und ohne Last gemessen; sie werden vor allem durch die Eisenverluste des Kerns bestimmt. Die Lastverluste werden aus der im Kurzschlussversuch mit Nennstrom gemessenen Impedanz berechnet; sie werden bei Nennlast in der Regel durch die Kupferverluste dominiert.

2.1 Eisenverluste

Der Eisenkern eines Trafos muss zur Erfüllung seiner Funktion im Rhythmus der Betriebsfrequenz ummagnetisiert werden. Dabei entstehen u.a. aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des Kernwerkstoffes (Wirbelströme) Ummagnetisierungs- bzw. Eisenverluste. Die technische Entwicklung konnte die Eisenverluste in den letzten Jahrzehnten markant senken, vgl. Bilder 4 und 5. Wichtige Schritte dieser Entwicklung waren: Einsatz verbesserter Eisenlegierungen, z.B. kornorientierter Bleche (ab 1955), Reduktion der Blechdicke (seit 1985 0.23 mm), Einführung der "Step-lap" Blechstapelung (1989), La-

serbehandlung der Bleche zur Brechung der Kornstruktur. Der neueste Reduktionsschritt (1996) basiert auf einem eigentlichen Technologiesprung: sogenannte "amorphe" Bleche konnten für den Trafobau handhabbar gemacht werden. Diese sehr dünnen Bleche werden durch extrem schnelle Abkühlung der Eisenlegierung gewonnen, womit ein glasartiger Aggregatzustand (amorph, d.h. vollständig ungeordnete Legierungsatome) erreicht wird. Ein ausführlicher Technologiebeschrieb findet sich z.B. in [4].

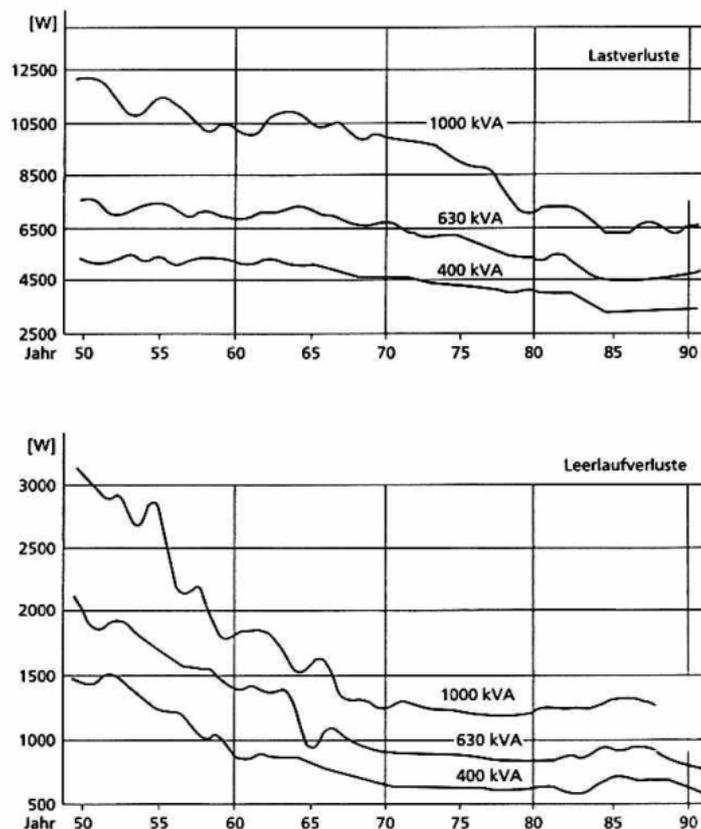


Bild 4 Reduktion der Trafoverluste [3]

2.2 Kupferverluste

Die Kupferverluste, auch als Lastverluste bezeichnet, hängen in erster Näherung von der Wicklungsauslegung ab: mehr Kupfer → kleinerer ohmscher Widerstand → kleinere Verluste. Mit der Wahl des Leitermaterials variieren auch die Verluste: mit Aluminium statt Kupfer steigen sie, bei reduziertem Gewicht; mit Silber sinken sie, bei massiver Kostenerhöhung. Zur Zeit werden supraleitende Wicklungen erprobt, welche aber wohl erst bei grösseren Trafos (Uebertragung) wirtschaftlich sein können [5]. Allerdings gibt es auch einen direkten Zusammenhang mit der Auslegung des Trafokerns: je kleiner der Kernquerschnitt, umso kürzer wird die erforderliche Wicklungslänge. Damit vermindern sich direkt die ohmschen Verluste, da für die Trafo-Grundfunktion nur die Windungszahl entscheidend ist. Magnetisch "dichtes" Kernmaterial bzw. hohe erreichbare bzw. zulässige Induktion ergeben daher kleinere Querschnitte und somit kleinere Lastverluste. Dies dürfte, neben Fortschritten bei der Auslegung, zu den markanten Lastverlust-Reduktionen gemäss Bild 5 beigetragen haben.

Verlustvergleich von 250 kVA Verteiltrafos

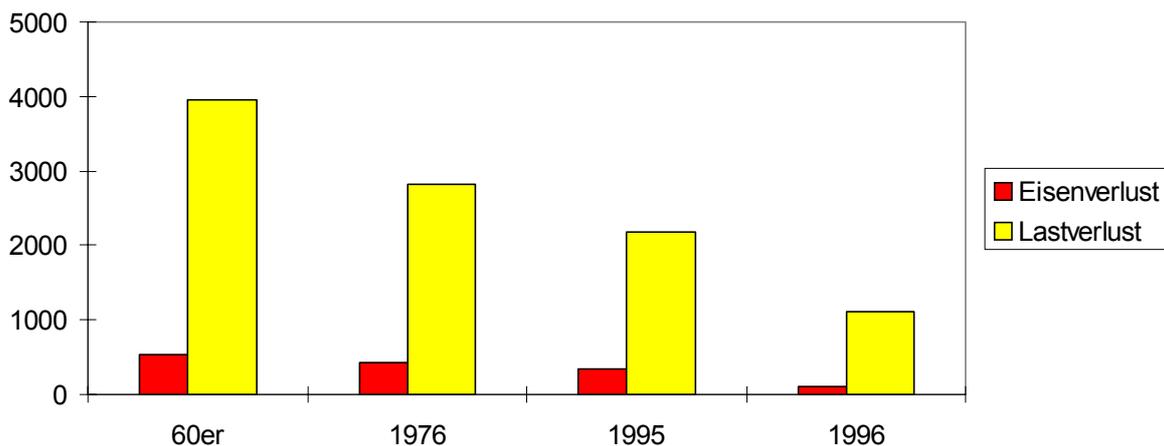


Bild 5 Verlustvergleich von 250 kVA Verteiltrafos verschiedener Generationen [6]

2.3 Einfluss der Auslastung bzw. des Lastganges

Eisen- und Lastverluste lassen sich durch verschiedene, voneinander z.T. unabhängige Massnahmen beeinflussen. Ihr Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad bzw. den gesamten Trafoverlust ist vom jeweiligen Lastverlauf abhängig, da die Eisenverluste lastunabhängig (aber spannungsabhängig!) sind und anfallen, sobald der Trafo eingeschaltet ist. Die Lastverluste dagegen sind in erster Näherung vom Quadrat des Wicklungsstroms und damit – bei konstanter Spannung – von der übertragenen Scheinleistung abhängig. Um einen Trafo aus wirtschaftlicher Sicht optimal auszulegen, muss daher von einer mittleren Auslastung

bzw. (genauer) von einem Lastgang ausgegangen werden. Zusätzliche für die Auslegung wichtige Faktoren sind Kurzschluss- und Einschaltverhalten.

Für Verteiltrafos haben die Betreiber (EWs) einerseits Erfahrungen von Lastgangmessungen und andererseits Richtwerte für die Ueberlastbarkeit der Trafos. In der Praxis muss ein im Betrieb stehender Verteiltrafo jeden, auch extremen Lastfall aushalten, wobei Ueberlastung kurzzeitig in einem gewissen Ausmass unproblematisch ist (thermische Trägheit). Jede Temperaturüberschreitung der Wicklung beeinträchtigt jedoch die Lebensdauer der Wicklungsisolation. Lastabhängige Zuschaltung eines weiteren Trafos wird erst bei grösseren Leistungen (Unterwerk) praktiziert.

Praxis-Hinweis zur Auslastung der Verteiltrafos: Die EKZ rechnen im Mittel mit 30 - 35% Auslastung der Verteiltrafos (bei einer Gesamt-Jahresnutzungsdauer der Höchstlast im Netz von ca. 5700 h/a, also 65%). Bei grösseren Leistungen werden z.T. 2 Verteiltrafos parallel betrieben, aber weniger aus Redundanz- als aus Gründen der Bemessung und Lagerhaltung. Dabei wird nur selten 1 von 2 ausgeschaltet, hingegen ist dies in Unterwerken eher üblich.

Bei sehr kleinen Trafos < ca. 20 VA enthält die Leerlaufleistung eine grössere ohmsche Komponente, weil aus geometrischen Gründen die relative Wicklungslänge zunimmt und somit der Magnetisierungsstrom bereits zu erheblichen Kupferverlusten führt. Im Extremfall, bei billigen Kleinsttrafos (< 2 VA) führt dies dazu, dass Leerlauf- und Nennleistungsaufnahme sich nicht mehr stark unterscheiden, vgl. Bild 6. Dies hat einen sehr ungünstigen Gesamtwirkungsgrad zur Folge, weshalb solche Trafos bei grossen Stückzahlen und langen Betriebszeiten erhebliche Anteile am Landes-Stromverbrauch beanspruchen (vgl. auch Bild 3).

Verluste von Printrafos (Beispiele)

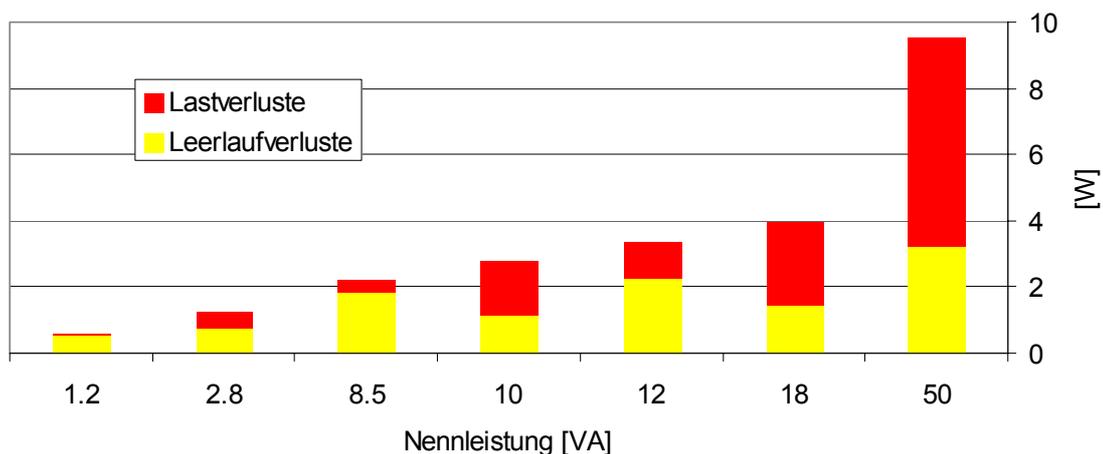


Bild 6 Leerlauf- und Gesamtverluste von Printrafos

3. Transport- und Umwandlungsverluste vom Generator bis zur Nutzanwendung

3.1 Ueberblick

Die Verluste der Hoch- und Höchstspannungs-Uebertragungskette vom Generator bis zum Unterwerk betragen nur rund 0.7%. Das Mittelspannungsnetz verursacht rund 1.1% Verluste, wovon die Trafos mit rund 0.4% den kleineren Anteil ausmachen. Relativ hohe, aber kaum wirtschaftlich verminderbare Verluste von rund 4.8% entfallen auf die Detailversorgung (Niederspannungsnetz) [1]. Transformatoren bei den Anwendern verursachen insgesamt Verluste in der Grössenordnung von 1 bis 1.5% (vgl. Bild 9: Leerlaufverluste ohne Verteiltrafos ca. 500 GWh, also ca. 1%). Alle Verlustzahlen beziehen sich auf die Netto-Stromerzeugung der Schweiz.

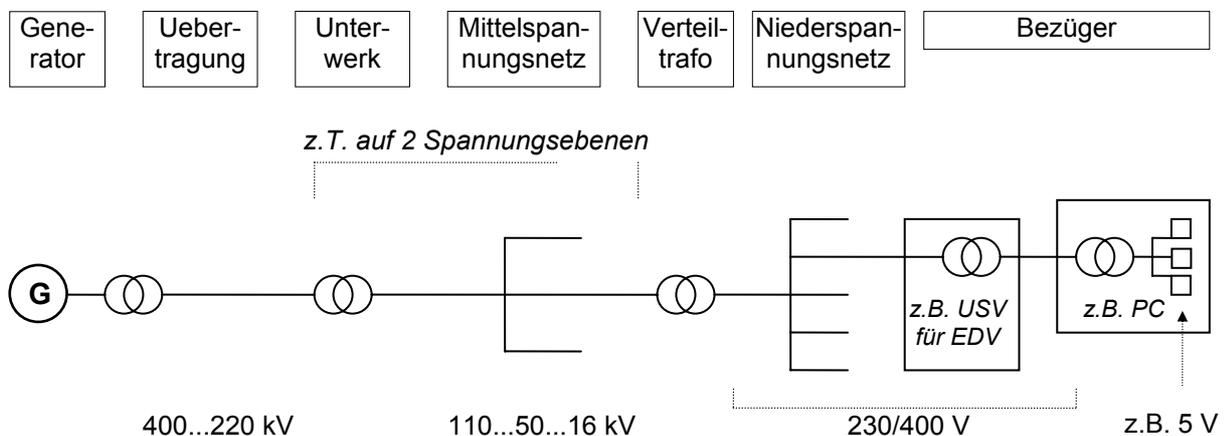


Bild 7 Elektrische Energieübertragung und -verteilung, Umwandlung beim Anwender

3.2 Verluste der Transformatoren bei den Anwendern

Um die Grössenordnung der Verluste kleinerer Trafos bei den Anwendern zu ermitteln, wurde ein Bottom-up Ansatz versucht. Trafo-Anwendungsbereiche und Leistungen [VA] wurden aus verschiedenen Quellen zusammengestellt. Da ein grosser Teil dieser Trafos mit kleinen bis mittleren Auslastungen betrieben wird und sich die Lastverluste technologisch weniger einfach beeinflussen lassen, wurden nur die Leerlaufverluste quantifiziert. Die Angaben in Bild 8/9 beruhen auf Datenblättern, Messungen, auf Ergebnissen anderer Projekte und z.T. auf Schätzungen.

Namentlich konnte auf folgende Quellen zurückgegriffen werden:

- Die heimlichen Stromfresser – Standby-Verluste... [2]
- Div. Arbeiten im Zusammenhang mit Aufträgen zu Verbrauchszielwerten zu Anhängen der Energienutzungsverordnung des Bundes
- Div. Untersuchungsprojekte im Rahmen von RAVEL (Impulsprogramm Rationelle Verwendung von Elektrizität 1990ff)

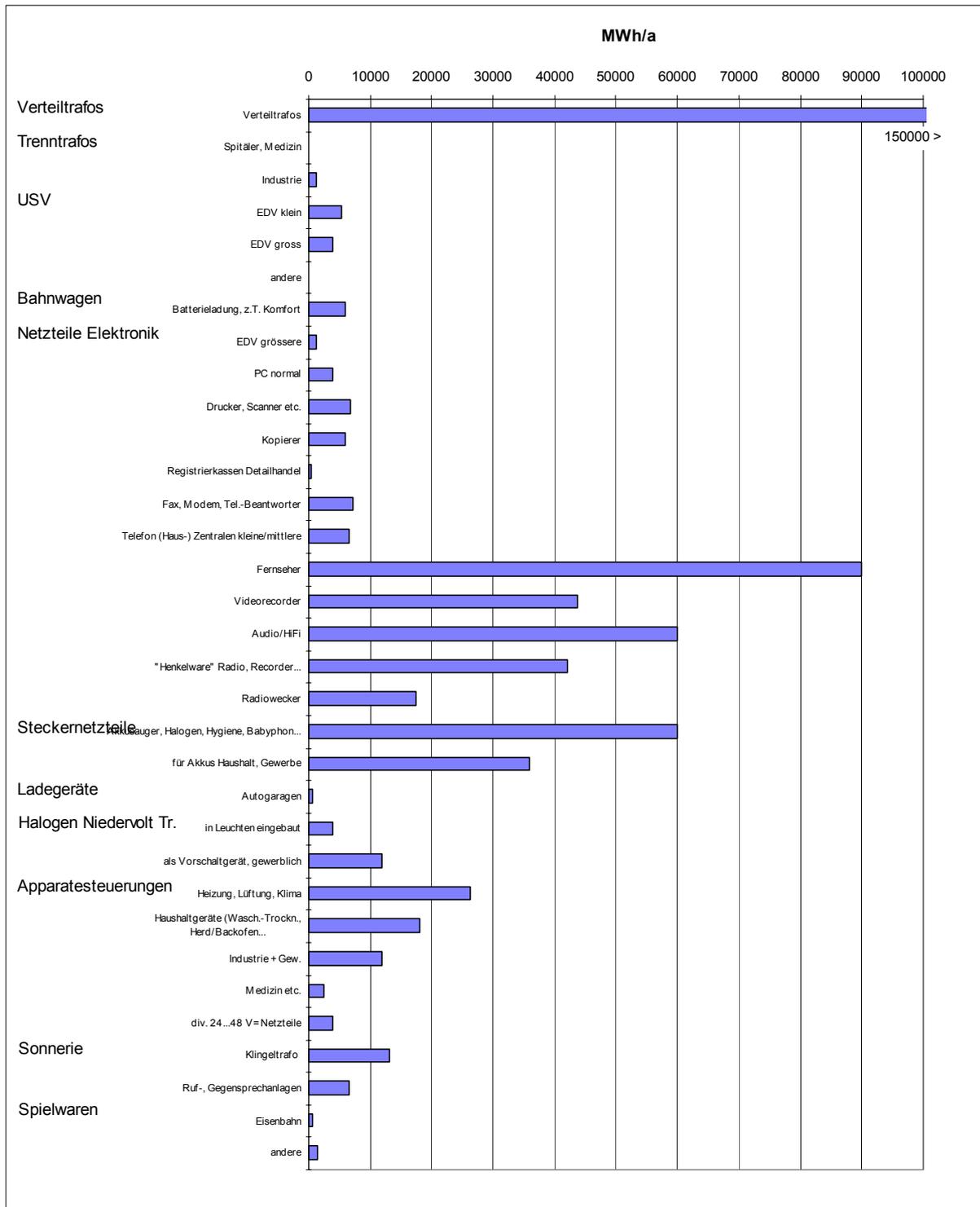


Bild 8 Leerlaufverluste von Netztrafos

Bild 9 Tabelle Leerlaufverluste von Netztrafos

Bereich	Anwendung	Leistung im Mittel [VA]	Leerlauf- verlust [W]	Anzahl CH [1000]	Betriebs- stunden [h/a]	Leerlauf- verlust [MWh/a]
Verteiltrafos	Verteiltrafos					150000
Trenntrafos	Spitäler, Medizin	6000	60	1	4000	240
	Industrie	6000	60	5	4000	1200
USV	EDV klein	1000	30	20	8760	5256
	EDV gross	10000	150	3	8760	3942
	andere					0
Bahnwagen 16 2/3 Hz	Batterieladung, z.T. Komfort	10000	300	4	5000	6000
Netzteile Elektronik	EDV grössere	1000	30	5	8760	1314
	PC normal	100	5	1000	800	4000
	Drucker, Scanner etc.	20	3	1500	1500	6750
	Kopierer	100	5	400	3000	6000
	Registrierkassen Detailhandel	50	4	30	4000	480
	Fax, Modem, Tel.-Beantworter	8	1.5	550	8760	7227
	Telefon (Haus-) Zentralen kleine/mittlere	50	5	150	8760	6570
	Fernseher	100	5	3000	6000	90000
	Videorecorder	20	5	1000	8760	43800
	Audio/HiFi	100	5	2000	6000	60000
	"Henkelware" Radio, Recorder...	15	3	7000	2000	42000
Radiowecker	5	1	2000	8760	17520	
Stecker-netzteile	Akkusauger, Halogen, Hygiene, Babyphon...	5	1.5	10000	4000	60000
Ladegeräte	für Akkus Haushalt, Gewerbe	5	1.5	4000	6000	36000
	Autogaragen	200	10	10	6000	600
Halogen Niedervolt Trafos	in Leuchten eingebaut	35	2	1000	2000	4000
	als Vorschaltgerät, gewerblich	50	3	1000	4000	12000
Apparate-steuerungen	Heizung, Lüftung, Klima	8	1.5	2000	8760	26280
	Haushaltgeräte (Wasch.-Trockn., Herd/Backofen...	5	1.5	3000	4000	18000
	Industrie + Gew.	20	3	1000	4000	12000
	Medizin etc.	20	3	200	4000	2400
	div. 24...48 V= Netzteile	100	5	200	4000	4000
Sonnerie	Klingeltrafo	5	1.5	1000	8760	13140
	Ruf-, Gegensprechanlagen	5	1.5	500	8760	6570
Spielwaren	Eisenbahn	25	3	1000	200	600
	andere	10	1.5	2000	500	1500
Total						649389

4. Technologien der Verlustminderung

4.1 Ansatz: Kerne aus endlosem Blechband

Die Kerne herkömmlicher Netztrafos sind aus gestanzten Blechen mit sogenanntem E-I-Schnitt oder aus rechteckigen Blechstreifen zusammengesetzt. Aus elektrotechnischer Sicht ergeben sich dadurch gegenüber einem "idealen" Trafo (magnetisch in Flussrichtung optimal leitend, elektrisch nichtleitend) beträchtliche Verluste durch die vielen Luftspalte und – vor allem beim E-I-Schnitt – durch die nichtideale Kornorientierung im Blech. Diese Verluste fallen als dauernd wirksame Eisenverluste vor allem bei schlecht ausgelasteten Trafos ins Gewicht. Die Herstellung der geschachtelten Kerne geschieht bei kleinen Trafos mit Automaten, bei Verteiltrafos ist sie jedoch wegen des Handlings der vielen einzelnen Bleche relativ aufwendig.

Für kleinere Leistungen bis etwa 2 kVA und einphasig sind Alternativen auf dem Markt, die sich durch sehr kleine Eisenverluste auszeichnen.

Ringkerntrafo

Die Spulen werden mit Spezialapparaten auf fertige, aus einem Band gewickelte ringförmige Kerne gewickelt. Weil dies nur bis zu einer begrenzten Drahtdicke möglich ist, ergibt sich eine obere Grenze der Leistung um 1 kVA. Wegen der extrem kleinen Streuung kann der je nach Phasenlage (Remanenz) hohe Magnetisierungs-Stromstoss Probleme mit Leitungsschutzorganen bereiten.

Schnittbandkern-Trafo

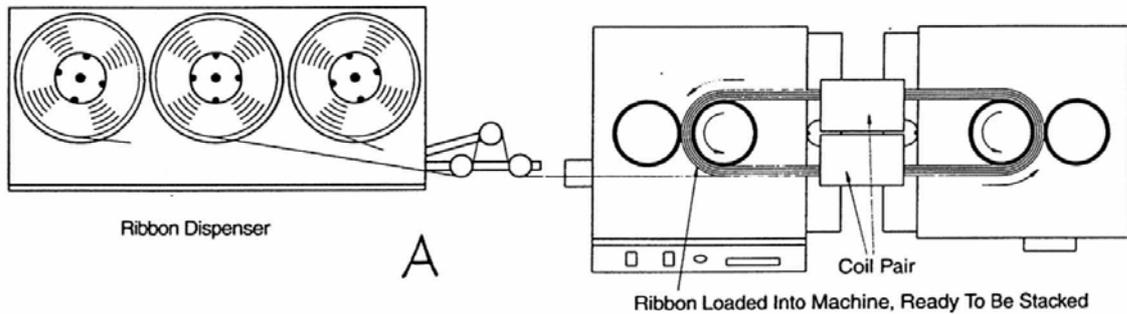
Vorgefertigte Spulen werden auf die geraden Schenkel halbirter, aus Band gewickelter Kerne aufgeschoben. Die Kerne müssen genau passend wieder zusammengesetzt werden. Dies ist relativ aufwendig und stellt hohe Anforderungen an Toleranzen, wenn eine akzeptable Streuung der Verlustwerte erreicht werden soll. Schnittbandkerne werden kaum mehr eingesetzt.

EMBREC-Trafo (Bandkern in Spulen hineinwickeln)

Die neue Fertigungstechnologie von EMBREC soll die Vorteile der Ringkern- bzw. der Schnittbandkerntrafos für grössere Leistungen (bis 1 MVA vorgesehen) und auch dreiphasig nutzbar machen. Dies wird möglich, indem der Bandkern in fertige Spulen hineingewickelt wird (vgl. Bild 10). Die neue Technologie soll auch eine sehr kostengünstige Fertigung erlauben: kein Stanzen und Verschachteln, wenige Band-Typen für ein breites Trafosortiment, kompakter Fertigungsautomat [7].

Im Verlauf der Arbeit zeigte sich, dass die EMBREC-Trafowickelmaschine noch nicht marktreif ist, vor allem weil sie zu langsam ist und weil Probleme mit der Blechband-Handhabung (verschlechtert magnetische Eigenschaften) und mit der Fertigung von 3-Phasentrafos nicht auf einfache Weise gelöst werden konnten. EMBREC hält eine tiefgreifende Umentwicklung für nötig, für welche vorerst Finanzmittel gesucht werden. Anzumerken ist, dass das von EMBREC in erster Linie angepeilte US-Marktsegment einphasige Verteiltrafos relativ kleiner

Leistung und kleiner Primärspannungen umfasst. Dort wären die Probleme mit dreiphasiger Ausführung nicht von Belang.



Herstellprozess in 2 Schritten:

- A Das Blechband wird lose in die fertigen Spulen eingebracht und auf drehenden Zylindern gehalten.
- B (1) Nach Befestigung des inneren Band-Endes am Spulenhalter (coil holding fixture) wird das Band fest darauf gewickelt, wobei das lose Bandpaket durch die Zylinder bewegt wird. Schlaufe für Schlaufe wird durch "Abtauchen" jeweils eines Zylinders freigegeben und angezogen (2). Ist das ganze Band festgewickelt, kann das Ende an der letzten Windung angeschweisst werden und der Trafo fertig konfektioniert werden (3).

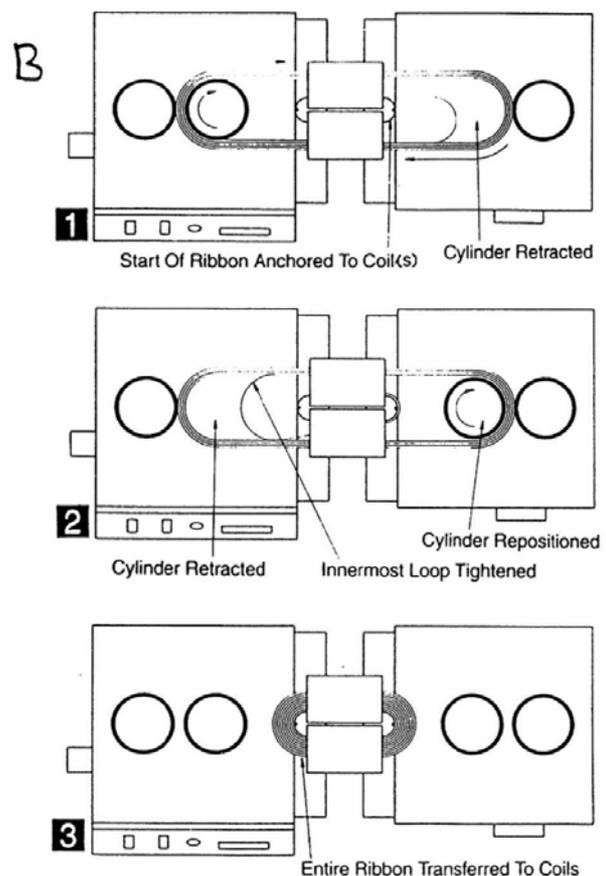


Bild 10 Herstellprozess des EMBREC-Trafos

4.2 Ansatz: Bleche aus amorphem Metall

Magnetbleche aus amorphem Metall – also Eisen-Bor-Kohlenstofflegierungen ohne kristalline Struktur – weisen äusserst geringe Leerlaufverluste auf, auch im Vergleich mit neuesten 0.23 mm Hi-B Texturblechen. Werden die Trafos mit solchen Kernen auf eine Optimierung der Gesamtverluste hin speziell ausgelegt, so resultiert auch eine Reduktion der Lastverluste im Vergleich zu konventionellen Trafos (vgl. Bild 5).

Amorphmetall-Bänder werden durch extrem schnelle Abkühlung der Eisenlegierung gewonnen, womit ein glasartiger Aggregatzustand (amorph, d.h. vollständig ungeordnete Legierungsatome) erreicht wird. Das aus der Fertigung kommende Band kann wegen seiner Sprödhheit nur für gewickelte Kerne direkt verwendet werden und eignet sich daher nicht für die üblichen Drehstromtrafos. ALLIED SIGNAL (USA und Indien) hat ein Verfahren entwickelt und patentiert, um aus den endlosen Bändern Bleche zu konfektionieren, welche zu fünfschenkigen Trafokernen zusammengebaut werden. Diese Konstruktionsart ist wegen der besonderen Blecheigenschaften erforderlich und führt zu längeren und etwas schwereren Kernen als in gestapelter dreischenkiger Bauweise üblich. Ein ausführlicher Technologiebeschrieb findet sich z.B. in [4]. Zur Zeit sind allein in der Schweiz mindestens 20 von ABB Sécheron SA gelieferte Verteiltrafos mit Amorphmetall-Blechen im Einsatz. Weil eine wirtschaftliche Blechbeschaffung nur in relativ grossen Losen möglich ist, stockt offenbar die weitere Vermarktung.

4.3 Ansatz: Hochfrequenz (z.B. Schaltnetzteil)

Die Dimensionen magnetisch gekoppelter Spulen (= Trafos) gegebener Uebertragungsleistung hängen stark von der Betriebsfrequenz ab. Da sowohl Eisen- wie Kupferverluste direkt von den Dimensionen abhängen (vgl. Abschnitte 2.1/2.2), lassen sie sich durch Erhöhen der Betriebsfrequenz stark vermindern. Höhere Betriebsfrequenzen als 50/60 Hz wurden in der Flugzeugtechnik (400 Hz) schon lange eingesetzt, allerdings in erster Linie wegen der Gewichtseinsparung.

Die Entwicklung von Schaltnetzteilen, welche diesen Zusammenhang ausnützen, war wohl ebenfalls in erster Linie durch die damit erreichbaren Raumbedarfs- und Gewichtsreduktionen ausgelöst. Deshalb sind die heute in verschiedenen Bereichen (v.a. Industrieelektronik, EDV, zunehmend auch Konsumelektronik) eingesetzten Schaltnetzteile nicht immer auch Stromspar-Netzteile. Da jedoch die Trafos (falls überhaupt benötigt) mit dem Hochfrequenzbetrieb (z.B. 30 kHz) sehr klein und verlustarm werden, kann mit entsprechendem Elektronik-Design das ganze Netzteil verlustarm konzipiert werden. Beispiele:

- Neuere Photovoltaik-Wechselrichter, zur Verlustminderung des kostbaren Solarstroms.
- "Mainy", ein sehr kleines Stecker-Schaltnetzteil mit Festspannungen und Ausgangsleistungen von 3, 6, 12 W. Der Leerlaufverlust scheint jedoch noch nicht wirklich minimal (6 und 12 W Typen gemessen: ca. 0.6 W), das "Mainy" kostet ein Mehrfaches eines normalen Netzteils.



Bild 11: "Mainy"

- Professionelle Vorschaltgeräte für Halogen-Kleinspannungslampen. Hier ist neben der Verminderung der Verlustwärme (in knappen Einbausituationen wichtig) auch die kleine/flache Bauweise von Bedeutung.

Mit der Verfügbarkeit von Leistungshalbleitern immer höherer Spannungsfestigkeit wird der Einsatz von Hochfrequenztrafos auch in höheren Spannungs- bzw. Leistungsbereichen machbar [8]. Diese vorerst relativ teure Technologie dürfte vor allem in Fällen sinnvoll sein, wo neben dem Wirkungsgrad das Gewicht von grösserer Bedeutung ist, z.B. bei mobilen Einrichtungen wie Lokomotiven, Reisezugwagen, Elektro-Strassenfahrzeugen.

4.4 Ansatz: Bedarfsgesteuert Ein- und Ausschalten (Kleintrafos)

Kleintrafos von alternativ batterieversorgten Konsumgütern (Radio-, Cassetten-, CD-Geräte etc.) sind mangels netzseitigem Schalter (vgl. auch Abschnitt 1.8) oft rund um die Uhr am Netz, obwohl das Gerät eigentlich nur wenige hundert Stunden pro Jahr im Betrieb ist. Eine Entwicklung zur Vermeidung dieser Leerlaufverluste wurde mit dem Prix "eta" 1996 [9] ausgezeichnet: Ein "Pausenschaltungs-IC" von Aspro Technology AG, Wildegg, trennt den Trafo vom Netz, wenn keine Last anliegt. Es ist bereits in einem eher hochpreisigen Produkt auf dem Markt (Halogenleuchte, Mehrpreis für "Energiemanagement" ca. 45 Fr.).

Herstell- und Einbaukosten eines solchen IC stehen möglicherweise in einem ungünstigen Verhältnis zu den Kosten eines Steckernetzteils. Der Nutzen ist nicht ganz einfach zu kommunizieren (kleine Leistung, nur wirksam wenn eingesteckt bleibt...). Wird das IC hingegen in Geräte mit eingebautem Netzteil integriert, so machen seine Kosten einen kleineren Anteil aus und der Nutzen kann evtl. erweitert werden: durch Netztrennung vermindert sich das Brandschadenrisiko (explodierende Entstörkondensatoren sind häufige Brandverursacher).

5. Sparpotentiale und Realisierungsperspektiven

5.1 Verteiltrafos

"Natürlicher Ersatz" durch konventionelle gute Trafos

Die Beschaffung von Verteiltrafos der Elektrizitätswerke geschieht teilweise zum Ersatz wegen Schäden oder zum vorsorglichen Ersatz wegen drohender Mängel, meist aber bei Neuerschliessungen und Umdispositionen wegen Leistungserhöhung oder Umbau von Anlagen und Leitungen. Die neu zu beschaffenden Trafos entsprechen üblicherweise dem neuesten Stand des Marktangebotes, wobei die Verluste durch Kapitalisierung bei der Evaluation berücksichtigt werden. Bei wachsendem Trafobestand sinkt der Anteil älterer, verlustreicher Trafos von selbst.

Bleibt der Bestand aber etwa konstant (was bei erfolgreichen Stromsparbestrebungen möglich ist) oder sinkt er gar, so drängt sich eine Wirtschaftlichkeitsrechnung bezüglich Ersatz betriebstüchtiger älterer Trafos aus Energiespargründen auf. Dies weil bei pfeglichem Umgang (kaum Ueberlastungen) die Trafos sehr lange betriebstüchtig bleiben können, z.B. über 40 Jahre! Soll die Rechnung einigermaßen vollständig sein, so ist eine eigentliche Oekobilanz zu erstellen, welche auch die Entsorgung der auszuscheidenden Trafos sowie Aufwände des (betrieblich nicht nötigen) Austausches umfassen muss. Eine Schlüsselrolle spielen die massgebenden Strompreise und damit auch der Spotmarktpreis. Steigen die Preise z.B. durch Einführung einer Energiesteuer, so beschleunigt dies tendenziell den vorzeitigen Ersatz und den Einsatz von Spartechnologien, sinken die Preise – etwa als Auswirkung der Strommarkt-Liberalisierung – so besteht weniger Anreiz für Sparmassnahmen.

Eine Quantifizierung von Ersatz-Strategien für Verteiltrafos bezüglich Energieeinsparung und gesamtwirtschaftlichem Nutzen soll in einem separaten Projekt untersucht werden.

Trafos mit amorphen Blechen

Zur Zeit können Zuverlässigkeit, Kurzschlusseigenschaften sowie weitere Neben-Qualitäten der Trafos mit amorphen Blechen noch nicht aus Erfahrung beurteilt werden. Auch ist bei dem noch kleinen Angebot die Preisentwicklung kaum absehbar, da einerseits (noch) nicht kostendeckende Einführungspreise denkbar sind, andererseits aber auch Rationalisierungspotential bei der Herstellung und Kostenminderungen durch Auslaufen des Patentschutzes von ALLIED SIGNAL.

Angesichts der Langlebigkeit der Verteiltrafos und des schwach oder nicht mehr steigenden Stromverbrauchs würde der Anteil solcher Trafos auch bei Bevorzugung in der Beschaffung insgesamt nur langsam zahlenmässige Bedeutung erhalten. Als Gedankenbeispiel: bei 30 Jahren Lebensdauer, Null-Verbrauchswachstum und einem Marktanteil von 50% sind bis in 15 Jahren nur 25% der Verteiltrafos durch "Amorph-Trafos" ersetzt. Wird eine Verlustreduktion von 70% gegenüber den ersetzten angenommen (vgl. 2.2), so vermindern sich die Verluste der gesamten Verteiltrafos dadurch von 0.4% der Landeserzeugung (vgl. 1.2) auf 0.33%. Immerhin entsprechen die eingesparten 0.07% knapp 40 GWh/a.

Supraleitende Trafos

Diese würden, nach heutigem Stand der Erkenntnisse [5] wegen der erforderlichen Tiefkühlung erst für grössere Leistungen wirtschaftlich, also im Anwendungsbereich Energieübertragung (welcher hier nicht näher betrachtet wird). Sollten allerdings Werkstoffe für nochmals deutlich höhere Supraleitungs-Temperaturen gefunden werden, so ändert dies die Voraussetzungen zugunsten einer Erweiterung des Einsatzgebietes. Für das resultierende Sparpotential und seine Realisierungsfristen gilt ähnliches wie für Verteiltrafos mit amorphen Blechen.

5.2 Trafos mit einigen kVA

EDV-, USV-, Potentialtrenn-Trafos

- Trafos mit Dauerbetrieb, z.B. für EDV-Anlagen, dürften aufgrund der relativ raschen technischen Veraltung der Systeme in absehbarer Zeit durch neue, sparsamere Technologien (Schaltnetzteil bzw. Hochfrequenz) ersetzt werden. Als Grob-Abschätzung des Sparpotentials können 30...60% des Verlustes gemäss Bild 9 sowie ein zusätzlicher Anteil der Lastverluste innert 15 Jahren angenommen werden, was eine Größenordnung von 20 MWh/a ergibt.

Trafos von Reisezugwagen, Speisewagen

Dieses Segment mittlerer Trafos beansprucht einen in diesem Leistungsbereich bedeutenden Anteil der Trafoverluste (Bild 8) und weist einige Besonderheiten auf:

- Lange Lebensdauer (z.B. 20 Jahre bis zu einer Gesamtrevision R4, ggf. 40 Jahre und mehr bis zur Verschrottung)
- Betrieb bei 16 2/3 Hz, was ein ungünstiges Leistungsgewicht ergibt
- Kompromiss zwischen Gewicht, Wirkungsgrad und Einschalteigenschaften.

Der Ersatz dieser Trafos durch Hochfrequenzwandler scheint zu beginnen. Allerdings wird er sich über eine lange Zeit erstrecken und ist meist durch nicht-energetische Randbedingungen bestimmt: nur bei Gesamtrevision bzw. Beschaffung von Bahnwagen sind auch die Stromversorgungssysteme grundlegend betroffen. Im Rahmen des E2000 Projekts "ENPER" [10] werden Beurteilungsgrundlagen für Energiesparmassnahmen an Bahnwagen geschaffen.

5.3 Kleintrafos

Kleintrafos sind energetisch und kostenmässig in der Regel "Nebensache", d.h. ein Ersatz oder sonstige Massnahmen an bestehenden Geräten aus Energiespargründen kommen nicht in Frage. Somit ist das Sparpotential abhängig von:

- Verfügbarkeit sparsamerer Technologien für die Funktion "Kleintrafo" (Kleinspannungsversorgung mit Potentialtrennung), ohne bzw. mit am Markt verkaufbaren Mehrkosten
- Nutzungsdauer bzw. Ersatzrate bestehender Geräte mit Kleintrafos
- Markteinführung neuer Elektrizitätsanwendungen, welche die Funktion "Kleintrafo" benötigen, mit den sparsameren statt der alten Technologien. Es resultiert keine absolute Einsparung, sondern eine kleinere Verbrauchszunahme.

Die Durchsetzung der in den Abschnitten 4.3 und 4.4 angesprochenen Technologien (Schaltnetzteile, Abschalt-IC,...) ist schwer abzuschätzen. Als grobe Schätzung nehmen wir an, entsprechende Spartechnologien seien in 10 Jahren selbstverständlich (bei EDV-Anwendungen ist es z.T. schneller gegangen, vgl. E2000 Label-Grenzwerte, Bild 12). Dann dürfte es weitere 5 bis 10 Jahre dauern, bis alle Geräte ersetzt sind.

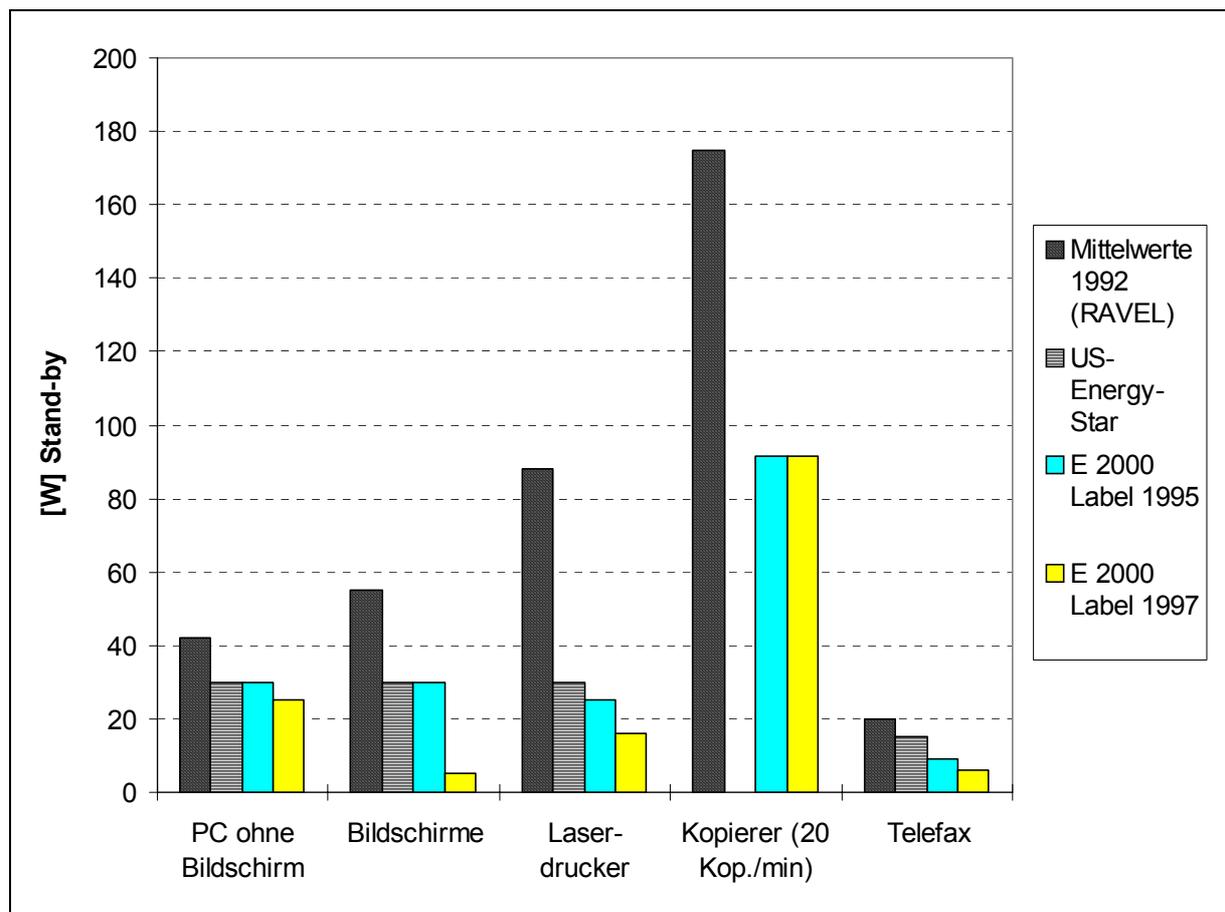


Bild 12 Stand-by Verbrauchswerte bzw. Grenzwerte von Bürogeräten

Nach den Erfahrungen der letzten Jahre dürften weiterhin neue Elektrizitätsanwendungen mit der Funktion "Kleintrafo" auftauchen. Zu nennen sind: Multimedia-Verbreitung, Mobiltelefone (Ladegeräte), Computerisierung der Haushalte inkl. Internet über Kabel, neue Gadgets im Bereich Hobby, Spielzeug, Körperpflege... Eine Abschätzung ist schwierig; als grobe Annäherung nehmen wir an, dass gut die Hälfte der Einsparungen durch neue "Kleintrafo"-Technologien kompensiert wird.

5.4 Gesamtschau Trafoverluste (ab Unterwerk)

Die Tabelle Bild 13 zeigt eine **grobe Schätzung** "mittlerer" Werte zwischen optimistischer und pessimistischer Perspektive. Der Zeithorizont von 15 Jahren entspricht der Lebensdauer typischer haustechnischer Anlagekomponenten; EW-Verteiltrafos leben mindestens doppelt so lang, Konsumgüter und EDV-Anlagen etwa halb so lang. Es würde den Rahmen des Projektes sprengen, feinere Differenzierungen zu versuchen und Randbedingungen wie Energiepreise, Konjunktur etc. einzubeziehen.

Anwendungsbereich	Verteiltrafos (5.1)	Trafos mit einigen kVA (5.2)	Kleintrafos (5.3)	Gesamt
Verluste heute (gem. Bild 8 + geschätzte Lastverluste), [GWh/a]	200	50	600	850
Relatives Sparpotential innert 15 Jahren (mittlerer Wert) *	- 50%	- 40%	- 70%	
Mögliche Zunahme der Anwendung innert 15 Jahren *	10%	15%	40%	
Resultierende Veränderung ca.	- 40%	- 25%	- 30%	- 32%
Resultierender Verlust in 15 Jahren [GWh/a]	120	37.5	420	577.5
* enthält auch den Ersatz durch HF-Schaltnetzteile				

Bild 13 Abschätzung Trafoverluste heute und denkbare Perspektive

6. Hinweise zur Umsetzung der Sparpotentiale

6.1 Beschleunigung des natürlichen Ersatzes durch Kostenrechnung

Als "natürlichen Ersatz" bezeichnen wir den Ersatz von Geräten und Einrichtungen aus funktionellen Gründen, also bei Defekt oder wegen technischen Ungenügens (Leistung, Sicherheit etc.). Die Lebensdauer bis zum natürlichen Ersatz sollte mindestens der Amortisationszeit einer Wirtschaftlichkeitsrechnung entsprechen. Ein "vorgezogener Ersatz" kann aus verschiedenen Gründen angezeigt oder nötig sein:

- Kompatibilität mit neueren Einrichtungen erforderlich
- Administrative Gründe wie z.B. Umzug, Renovation, einheitliche Beschaffung
- Ungenügen von Nebenfunktionen bzw. Verfügbarkeit vorteilhafter Nebenfunktionen oder Eigenschaften neuer Marktangebote. Der **Energieverbrauch** bzw. die Verluste können solche Eigenschaften sein.

Wenn der Energieverbrauch bzw. Verlust eine Nebenfunktion ist, wird er oft bei der Evaluation vergessen oder vernachlässigt (etwa weil die Berechnung/Abschätzung zu kompliziert erscheint). Die Berechnung von Lebensdauer-Energieverbräuchen ist jedoch in vielen Fällen sehr einfach und erlaubt damit eine quantitative Beurteilung bei der Evaluation. Dabei erweist sich oft, dass die Lebensdauer-Energiekosten gefühlsmässig stark unterschätzt werden.

Beispiele: **Lebensdauer-Standby-Stromkosten** (nur Anteil Trafoverlust):

- Kleingerät im Dauerbetrieb, 1.5 W, 10 Jahre, 25 Rp/kWh:	Fr.	32.85
- mittl. Gerät wie TV, HiFi mit 5 W	Fr.	109.50
- älteres Geräte wie TV, HiFi, Telefax o.ä., 20 W	Fr.	438.—

Wären sich die Käufer und Betreiber dieser Beträge bewusst bzw. würden sie die Rechnung anstellen, so würde bei einer Neu- und Ersatzbeschaffung vermehrt auf den Energieverbrauch geachtet. Kostenbewusste Betreiber würden auch die Möglichkeiten eines vorzeitigen Ersatzes gewisser Einrichtungen unter dem Gesichtspunkt der Betriebskosten prüfen. Erweist sich ein vorzeitiger Ersatz als wirtschaftlich, so dürfte in den meisten Fälle auch die "ökologische Wirtschaftlichkeit" aufgrund von Energieeinsparungen gegeben sein.

6.2 Labelling, Vorschriften

In Marktsegmenten, wo Käufer keine Energiekostenberechnungen anstellen, kann mit Energie-Labeln eine energiebewusstere Gerätewahl unterstützt werden. Dies hat sich beim Energie 2000 Label für Bürogeräte bereits gut bewährt. Gerade bei Elektronikgeräten (Büro und Haushalt) ist der Stand-by Stromverbrauch für den Gesamtverbrauch oft ausschlaggebend und rührt zu einem guten Teil vom Leerlaufverlust des Netztrafos bzw. Netzteils her. Mit dem

Labelling werden also indirekt stromsparende Netzteile oder deren "Energiemanagement" gefördert.

Im Zusammenhang mit der Energienutzungsverordnung des Bundes wurden auch Grenz- und Zielwerte für den Stromverbrauch serieller elektrischer Komponenten untersucht. Dabei wurden Netztrafos nicht in Betracht gezogen, was auch im Nachhinein sicher richtig ist. Indirekt wurden Kleintrafos im Bereich elektronischer Geräte mitbetrachtet, wobei auch die Idee eines generellen Stand-by Grenzwertes von z.B. 2 W auftauchte. Mit dem aus diesem Bereich schliesslich hervorgegangenen Energie 2000 Label ist offensichtlich eine gute Lösung gefunden worden.

6.3 Folgeprojekt betreffend Verteiltrafos

Grössere Elektrizitätswerke stellen bei der Beschaffung von Transformatoren bis hinunter zu den Verteiltrafos Wirtschaftlichkeitsrechnungen zur Verlustbewertung an. Dazu werden Leerlauf- und Lastverluste mit einem meist abgeschätzten Lastverlauf und den massgebenden Stromtarifen über die Amortisationsdauer bewertet. Die entsprechend kapitalisierten Verluste werden zum Angebotspreis eines Trafos hinzugezählt und die resultierende Summe wird zur Evaluation herangezogen.

Da aufgrund des verlangsamten Stromverbrauchswachstums gegenüber früher weniger Trafos wegen Leistungserhöhung ersetzt werden, ist z.T. eine gewisse Ueberalterung festzustellen. Obwohl sorgfältig betriebene 40-jährige Verteiltrafos durchaus noch sicher funktionieren können, liegen ihre Verluste doch unverhältnismässig hoch (vgl. auch Bilder 4 und 5), so dass ein Ersatz wirtschaftlich gerechtfertigt sein könnte. In einem Folgeprojekt soll ein einfach nachzuvollziehendes Modell für die Beurteilung des wirtschaftlich sinnvollen Ersatzzeitpunkts von Verteiltrafos erstellt werden. Dabei sollen neben den erforderlichen Trafodaten auch Lastverläufe auf einfache Weise in die Verlustberechnung einbezogen werden (Lastmodell, mit wenigen Inputdaten parametrisierbar). Zu gegebener Zeit ist eine Publikation im SEV-Bulletin vorgesehen.

7. Literatur

- [1] F. Schwab: Das Energiesparen der Elektrizitätswirtschaft am Beispiel der Transformatorenverluste.
Bull. SEV/VSE 82 (1991), 22.
- [2] (Arbeitsgemeinschaft): Die heimlichen Stromfresser, Standby-Verluste von Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten.
BEW Schriftenreihe, Studie Nr. 51, Bern 1993
- [3] H. R. Ris: Transformatoren: verlustarm und umweltfreundlich.
TR Transfer Nr. 21/1994
- [4] Pauwels International, R&D Departement: Transformateurs de distribution à noyau en metal amorphe.
Firmenunterlagen 1995, durch EKZ erhalten
- [5] A. Demarmels: Die Aspekte supraleitender Transformatoren.
Elektrotechnik Nr. 12 - 1996
- [6] Persönliche Mitteilung A. Fankhauser, EKZ, Zürich
- [7] Produkteankündigung EMBREC Corp. 1996, Massachusetts, USA
- [8] Persönliche Mitteilung und Demonstration Dr. A. Stoev, IDS AG, Zürich
- [9] Prix "eta" Broschüre 1996 (Infel, Zürich), sowie:
Clevere Energiesparerer auf dem Siegertreppchen, Verleihung des Prix "eta" für Energievernunft.
Bull. SEV/VSE Nr. 24/1996
- [10] ENPER-Team, C. U. Brunner et al: Energiesparen bei Reisezügen
4. ENPER-Bericht, BEW, Bern 1997